

EL MÉTODO DE LAS IMÁGENES EN LA HIDROLOGÍA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

Raúl Arrijo Juárez y Gabriel Echávez Aldape

Departamento de Hidráulica. División de Estudios de Posgrado
Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México.
Ciudad Universitaria. Apdo. Postal 70-256. Coyoacan 04510. Ciudad de México, Mexico.
E-mail: arrijo_juarez_raul@yahoo.com, echavez@unam.mx

Introducción

La definición más sencilla del agua subterránea se refiere al agua que ocupa todos los vacíos o intersticios en un estrato geológico. Se forma entonces una zona saturada que se diferencia de la otra zona no saturada o de aireación en la cual los vacíos están llenos de agua y aire. No existe una frontera bien definida entre los dos tipos de zona ya que dicha frontera es interdependiente y el agua se mueve libremente de una zona a otra.

El agua subterránea es una fuente muy importante de abastecimiento de agua en todo el mundo para toda clase de usos, tales como irrigación, uso industrial, uso municipal, etcétera. El agua subterránea se aprovecha mediante la perforación de pozos, que es una práctica empírica cuyo origen se pierde en los tiempos antiguos. Un pozo de agua es un agujero o cavidad, generalmente vertical, que se excava en el terreno para hacer que el agua suba a la superficie. El principal uso considerado es el abastecimiento de agua, aunque también se contemplan otros objetivos, tales como la exploración y la observación del agua sub superficial, la recarga artificial de los acuíferos con agua tratada, o la disposición de aguas residuales municipales o industriales. Existen muchos métodos de perforación de pozos. La selección de un método específico depende en general del objetivo del abastecimiento de agua, de la cantidad de agua requerida, de la profundidad a la que se encuentre el acuífero, de las condiciones geológicas y de factores económicos.

El agua subterránea en su estado natural siempre se está moviendo. Este movimiento está gobernado por principios hidráulicos ya conocidos desde hace algún tiempo. El flujo de agua a través de un acuífero, que es una formación geológica que tiene estructuras que permiten el tránsito de cantidades significativas de agua bajo condiciones de campo ordinarias, se describe mediante la ley de Darcy. En la ecuación de Darcy, la permeabilidad (que es una medida de la velocidad con la cual fluye el agua a través de un medio poroso) es una magnitud fundamental. Generalmente, la permeabilidad se determina directamente mediante mediciones de laboratorio o de campo. A partir de la ley de Darcy y de la ecuación de la continuidad, se obtienen las ecuaciones generales del flujo del agua subterránea en medios porosos. Estas ecuaciones se basan en la hipótesis de que el medio poroso considerado es isotrópico, homogéneo y de extensión prácticamente infinita. Esta hipótesis se considera razonable en la mayoría de los casos, ya que el error en que se incurre es despreciable. Sin embargo, cuando se perfora un pozo o una batería de pozos cerca de una frontera natural o artificial que invalida la hipótesis de extensión infinita, como por ejemplo un río o una frontera impermeable, el error en que se incurre al aplicar una ecuación de flujo radial ya no es despreciable. La aplicación del método de las imágenes tiene como objetivo subsanar esta deficiencia.

Objetivos

Presentar el método de las imágenes, que permite calcular correctamente el cono de abatimiento para un pozo o una batería

de pozos en el caso de que ya no se considere razonable la hipótesis de un acuífero de extensión infinita por la presencia de una barrera impermeable o un accidente que limiten la extensión del acuífero.

Metodología

En la operación de un pozo, se bombea agua del acuífero que rodea al pozo, por lo que desciende el nivel del manto freático para el caso de un acuífero no confinado, o de la superficie piezométrica para el caso de uno confinado. El abatimiento de un punto dado de la curva de abatimiento es la magnitud del descenso del nivel del agua. Una curva de abatimiento muestra la variación del abatimiento con respecto a la distancia desde el pozo. En tres dimensiones, la curva de abatimiento describe una forma cónica que se conoce como cono de depresión. El límite exterior de este cono define el área de influencia del mismo. Cuando un pozo está operando a una tasa constante, la influencia de la descarga se extiende hacia afuera con el tiempo. La tasa de descenso de la carga multiplicada por el coeficiente de almacenamiento y acumulada para el área de influencia, es igual a la descarga o gasto del pozo. Como el agua proviene de la reducción del almacenaje dentro del acuífero, la carga sigue descendiendo siempre que el acuífero realmente sea infinito, por lo que no puede existir un estado de flujo permanente. Sin embargo, la tasa de descenso disminuye continuamente a medida que crece el área de influencia. Enseguida se presenta la ecuación diferencial parcial aproximada [1] que gobierna el flujo de agua no permanente en un acuífero confinado compresible con un espesor uniforme b :

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{S}{Kb} \frac{\partial h}{\partial t} \quad [1]$$

donde

h = carga piezométrica

x = coordenada en el eje x

y = coordenada en el eje y

z = coordenada en el eje z

S = coeficiente de almacenamiento

K = coeficiente de permeabilidad

b = espesor del acuífero

t = tiempo

La ecuación correspondiente a un acuífero no confinado es no lineal, por lo que no existe una solución directa para la misma. La ecuación [1] puede aplicarse a los acuíferos no confinados mediante aproximaciones siempre que el espesor saturado presente variaciones pequeñas. A partir de la ecuación [1] se obtienen diversas ecuaciones de flujo radial no permanente, que se basan en las siguientes hipótesis: 1) el acuífero es isotrópico, homogéneo y de extensión infinita, 2) el pozo penetra a todo el acuífero, 3) el diámetro del pozo es infinitesimal, y 4) el agua que se bombea del almacenaje se descarga instantáneamente al descender la carga piezométrica. Una ecuación de flujo radial no permanente es una ecuación de no equilibrio que se usa para

determinar las constantes de formación de un acuífero S y T ($T = Kb$) mediante pruebas de bombeo o para determinar la curva de abatimiento del pozo para un gasto dado si estas constantes se conocen. En este trabajo se consideran tres métodos semi gráficos para calcular la curva de abatimiento, los cuales son aplicables a acuíferos confinados, pero que también pueden aplicarse a acuíferos no confinados si el abatimiento es pequeño en comparación con el espesor saturado del acuífero.

Método de Theis

La curva de abatimiento se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$h_0 - h = \frac{114.6Q}{T} W(u)$$

donde

$h_0 - h$ = abatimiento en pies

Q = gasto del pozo en gal/min

T = coeficiente de transmisibilidad en gal/día/pie

W(u) = función de pozo

El argumento u está dado por:

$$u = \frac{1.87r^2S}{Tt}$$

donde

S = coeficiente de almacenaje adimensional

r = distancia en pies desde el pozo de descarga

t = tiempo en días desde que inicia el bombeo

Método de Jacob

Este método es aplicable para valores pequeños de r y valores grandes de t , de modo que el argumento u es pequeño. La curva de abatimiento se calcula con la siguiente ecuación:

$$h_0 - h = \frac{2.30Q}{4\pi T} \log \frac{2.25Tt}{r^2S}$$

Método de Chow

El método de Chow es un método simplificado semi gráfico que requiere de observaciones del cono de abatimiento en un pozo de observación cercano al pozo.

Resultados

El método de las imágenes se aplica a casos en los cuales la extensión del acuífero estudiado ya no se puede considerar infinita por la presencia de una barrera impermeable o algún otro accidente. El método consiste en substituir este accidente por pozos imaginarios o imágenes que produzcan los mismos efectos. Una imagen se introduce para crear un sistema de flujo hidráulico que sea equivalente a los efectos de una frontera física conocida sobre el sistema de flujo. El método de las imágenes es una aplicación del principio de superposición de causas y efectos. En este trabajo se consideran tres sistemas de flujo hidráulico:

Un acuífero limitado por una o más barreras impermeables que se explota mediante un pozo de bombeo. En este caso, se coloca un pozo imagen de descarga, opuesto al pozo de bombeo con el mismo gasto y a una distancia igual a la distancia del pozo de bombeo a la frontera impermeable. El efecto causado es que a lo largo de la frontera impermeable las curvas de abatimiento de

los pozos se cancelan mutuamente, por lo que no hay flujo a través de la frontera, que es el efecto deseado.

Un acuífero que está cerca de un río y que se explota mediante un pozo de bombeo. En este caso, se coloca un pozo imagen de recarga (un pozo mediante el cual se añade agua al acuífero, por lo que es el inverso de un pozo de bombeo) opuesto directamente y a la misma distancia del río que el pozo real de bombeo. Este pozo imagen opera simultáneamente y con el mismo gasto que el pozo real de bombeo, obteniéndose la curva de abatimiento como la suma algebraica de los respectivos abatimientos de los pozos (que son de signo contrario). Esto suministra una carga constante a lo largo del río, que es exactamente equivalente a la elevación constante del cono de abatimiento del acuífero, causada por el río que constituye la frontera del acuífero.

Un acuífero que es explotado mediante un sistema de pozos múltiples. En este caso, la curva de abatimiento en el área de influencia causada por la descarga de varios pozos es igual a la suma de las curvas de abatimiento individuales de los pozos. La cantidad de pozos y la geometría del campo de pozos son importantes para determinar la curva total de abatimiento.

Conclusiones

Cuando un pozo que penetra a un acuífero de extensión prácticamente infinita opera a un gasto constante, la influencia de la descarga se extiende hacia afuera con el tiempo. Como el agua proviene de una reducción del almacenaje dentro del acuífero, la carga sigue disminuyendo indefinidamente al mismo tiempo que el área de influencia crece, por lo que el flujo no es permanente. En los casos en los cuales la hipótesis de extensión prácticamente infinita del acuífero ya no es válida por la existencia de alguna barrera impermeable o accidente que hacen que la curva de abatimiento que se calcule con alguno de los métodos conocidos ya no corresponde a las observaciones medidas en campo, se puede emplear el método de las imágenes para corregir dicha curva.

Referencias bibliográficas

- Eagleson, Peter S.** (1970). *Dynamic Hydrology*. McGraw-Hill Book Co. Inc.
- Theis, C. V.** (1941). "The effect of a well on the flow of a nearby stream". *Transactions of the American Geophysical Union*, Vol. 22, pp. 734-738.
- Todd, David Keith** (1959). *Ground Water Hydrology*. John Wiley & sons. Nueva York. 336 pp.